

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2021.12.043

单轴对称截面桥墩弹塑性地震响应研究

王 巍

(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510600)

摘 要: 基于 OpenSees 软件,采用弹塑性纤维梁柱单元建立墩柱模型,考虑上部梁体重量、隔震支座及材料非线性的影响,采用 IDA 增量动力分析法对某单轴对称截面桥墩进行了结构弹塑性地震响应分析。计算结果表明,单轴对称截面的桥墩在单向地震作用下产生双向弯曲现象,在垂直于对称轴地震激励作用下,桥墩的双弯曲系数随着 PGA 的增加后降低,当 PGA 达到某个值之后,双弯曲系数不再有过大的变化,对于指导该类桥梁设计具有一定的参考意义。

关键词: 桥梁工程;桥墩;地震响应;弹塑性;OpenSees
中图分类号: U443.2 **文献标志码:** A

文章编号: 1009-7716(2021)12-0153-03

0 引 言

近年来,城市桥梁的建设得到了飞速发展,与公路桥梁不同的是,城市桥梁不仅需要满足交通功能,还要满足城市景观的要求。桥墩是桥梁结构的重要受力构件,也是桥梁外形构造的主要组成部分,而传统的矩形截面方墩、横向变宽花瓶墩等双轴对称截面桥墩已经不能完全满足桥梁结构造型的需求,为了让桥梁结构更加优美,现在的城市桥梁出现了较多异形截面桥墩,其中单轴对称截面桥墩应用最多,其特点为桥墩截面仅有一条对称轴,见图 1。

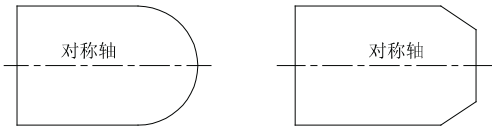


图 1 单轴对称截面示意图

目前,考虑非线性的桥墩地震响应研究集中在规则截面桥墩,对于异形桥墩,尤其是单轴对称截面桥墩的地震响应研究文献较少。本文基于 OpenSees^[1] 软件,采用弹塑性纤维梁柱单元建立墩柱模型,考虑上部梁体重量、隔震支座及材料非线性的影响,采用 IDA 增量动力分析法^[2]对某单轴对称截面桥墩进行了结构弹塑性地震响应分析,研究了单轴对称桥墩的地震响应行为特征,对于指导该类桥梁设计具有一定的参考意义。

1 计算模型

1.1 模型简介

基于 OpenSees,建立某单轴对称截面桥墩有限

元模型,采用一根杆单元模拟桥墩,墩底固接,采用集中质量块模拟上部结构梁体,梁体质量块和桥墩之间通过弹簧连接模拟隔振支座,通过建立桥墩动力模型计算结构弹塑性地震响应,以研究不同墩高桥梁弹塑性地震响应及差异性。模型简图见图 2。

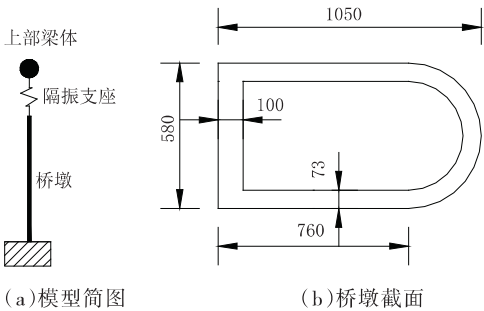


图 2 桥墩模型示意图(单位:cm)

所采用的地震激励时程见图 3,对应 $PGA=0.33g$ 。

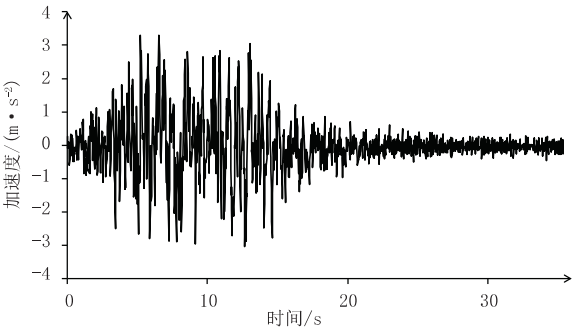


图 3 地震激励时程图

1.2 弹塑性纤维梁柱单元

采用弹塑性纤维梁柱单元,将单元截面离散成纤维,对于不同位置的纤维赋以相应的材料非线性应力—应变关系,不考虑剪切变形,假设纤维之间完全黏结且满足平截面假定,扭转刚度采用与弯矩、轴力均不耦合的弹性扭转理论。

目前较成熟可靠、计算高效的纤维梁柱单元为基

收稿日期: 2021-08-18

作者简介: 王巍(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

于柔度法的弹塑性纤维梁柱单元^[3]。柔度法将力作为未知量,采用力插值函数建立单元的柔度矩阵;基于柔度法的弹塑性纤维梁柱单元对于假定的内力分布,无论单元及纤维处于何种状态,平衡条件都能严格满足,能够更真实地反映结构中内力与变形的分布,不受单元材料非线性水平的影响和制约^[4]。

1.3 弹塑性材料本构

钢筋纤维采用考虑包辛格效应和硬化阶段修正的 Menegotto-Pinto 本构^[5],其曲线方程见式(1)、式(2):

$$\sigma^* = R_s \varepsilon^* + \frac{(1-R_s)\varepsilon^*}{(1+\varepsilon^{*R_b})^{1/R_b}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma^* = \frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r} \\ \varepsilon^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \\ R_s = \frac{E_{s2}}{E_s} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_s 为应变硬化系数; E_s 、 E_{s2} 分别为钢筋的初始弹模和屈服后弹模; σ_r 、 ε_r 分别为反向加载点的应力和应变; σ_0 、 ε_0 分别为渐变线交点的应力和应变。

混凝土纤维采用考虑箍筋对核心混凝土约束效果的 Mander 本构^[6],其曲线方程见式(3)。

$$\sigma_c = f_{cc} \frac{xr}{r-1+xr} \quad (3)$$

式中: f_{cc} 为约束混凝土的抗压强度; x 为约束混凝土的相对应变; r 为约束混凝土应力-应变曲线系数。

1.4 墩顶位移 IDA 分析

增量动力分析(IDA)是通过采用不同系数将地面运动参数进行调整获得一组地震动输入,运用这组地震动输入对结构进行非线性时程分析,最后绘制结构性能参数与地面运动参数的关系曲线的过程。本文中采用墩顶位移作为结构性能参数。

2 计算结果

2.1 墩顶位移的“双弯曲”现象

桥墩墩底截面以及坐标系见图4,在 z 方向输入地震激励得到的墩顶位移见图5,在 y 方向输入地震激励得到的墩顶位移见图6。

由图5、图6可知,在 z 方向地震激励作用下,墩顶 z 方向最大位移为0.341 m, y 方向最大位移为0.112 m;在 y 方向地震激励作用下,墩顶 y 方向最大位移为0.399 m,而 z 方向没有产生位移,即单轴对称截面的桥墩在对称轴方向的地震激励作用下,墩顶仅产生激励方向的位移,在垂直于对称轴方向地

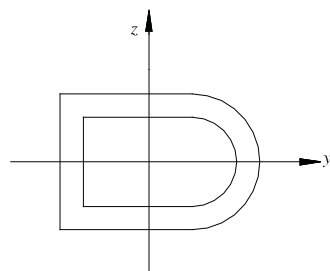


图4 桥墩截面坐标系示意图

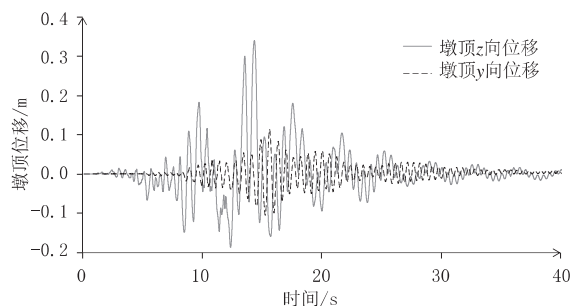


图5 z 向地震输入墩顶弹塑性位移图(单位:m)

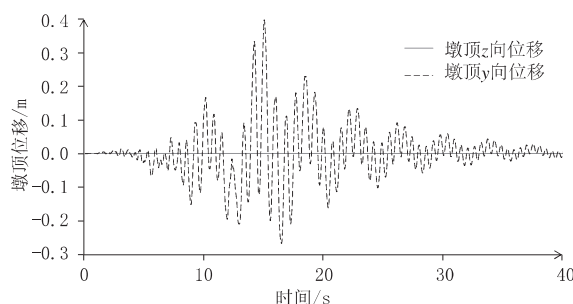


图6 y 向地震输入墩顶弹塑性位移图(单位:m)

震激励作用下,在对称轴方向、垂直于对称轴方向均产生墩顶位移,出现“双弯曲”现象。

2.2 “双弯曲”现象原因分析及验证

如图7所示,在地震荷载作用前,截面的质心和形心重合,当沿着 z 方向施加地震激励时, z 方向截面边缘的混凝土首先开裂,由于截面两侧混凝土不对称开裂且截面关于 z 轴不对称,导致有效截面的形心相对于质心不仅有 z 方向偏移,还有 y 方向偏移,从而导致桥墩质量产生的竖向动轴力对有效截面分别产生了两个方向的附加弯矩和,在垂直于激励方向的附加弯矩作用下,桥墩产生了垂直于激励方向的地震响应,从而出现“双弯曲”现象。

如图8所示,给桥墩施加 y 方向的地震激励时,则开裂后有效截面的形心仅产生一个方向的偏移,不会产生垂直于激励方向的偏移,桥墩动轴力没有产生垂直于激励方向的附加弯矩,宏观表现为没有出现“双弯曲”的现象。

如图9所示,为了验证以上推测,在 OpenSees 模型中将混凝土材料本构模型修改为线弹性进行线弹性分析,即不考虑混凝土的开裂作用,并在 z 方向

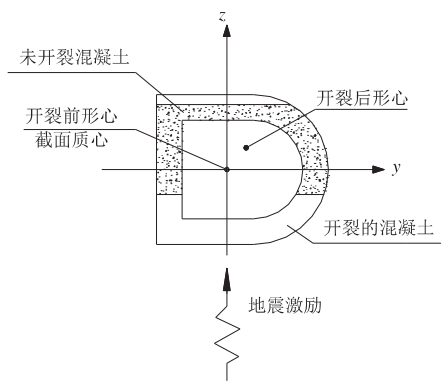


图 7 z 向地震激励引起形心偏移示意图

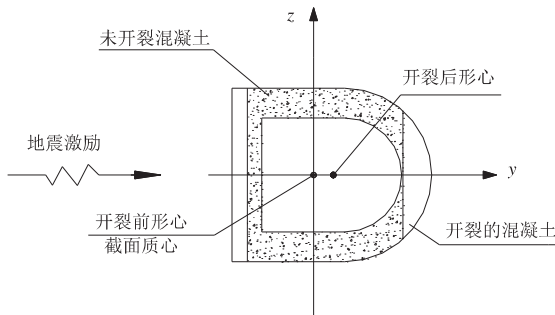


图 8 y 向地震激励引起形心偏移示意图

施加地震激励重新计算,得到墩顶位移时程曲线。

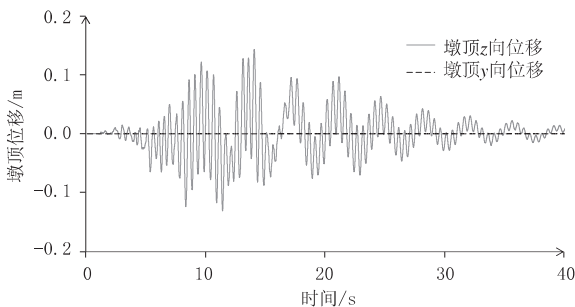


图 9 z 向地震输入墩顶弹性位移图(单位:m)

由图 9 可知,如不考虑混凝土的开裂作用,则在 z 方向地震激励作用下,墩柱不再出现“双弯曲”现象,进一步验证了“双弯曲”现象是由于混凝土不对称开裂后导致有效截面形心产生垂直方向偏移所造成。

综上所述,双弯曲现象是由于当截面主轴关于激励方向不对称时,混凝土的不对称开裂导致截面形心在垂直于激励方向产生偏移,从而使得轴向力产生了垂直于激励方向的附加弯矩所致,如混凝土不发生开裂则无双弯曲现象。

2.3 PGA 对“双弯曲”的影响

为研究 PGA 对“双弯曲”现象的影响,定义式(4)所示的双弯曲系数:

$$\eta = \frac{|D_{y,\max}|}{|D_{z,\max}|} \quad (4)$$

式中: $D_{y,\max}$ 为墩顶在平行于截面对称轴方向的最大

位移; $D_{z,\max}$ 为墩顶在垂直于截面对称轴方向的最大位移。双弯曲系数 η 为两个方向最大位移绝对值的比值。

如图 10 所示,在垂直于桥墩截面对称轴的 z 方向输入地震激励,并不断增加输入的 PGA,得到双弯曲系数变化曲线。

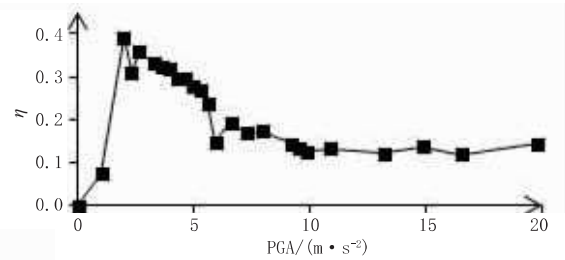


图 10 z 向地震输入双弯曲系数- PGA 曲线图

由图 10 可知,双弯曲系数随着 PGA 的增加先增加后降低,PGA 达到一定数值后双弯曲系数趋向于平稳不再减小,双弯曲系数最大值约为 0.4。推测造成这一现象的原因可能为一开始随着 PGA 的增加,截面开裂程度加剧,导致有效截面形心相对于质心的偏移不断增加,垂直激励方向的附加弯矩不断增加,双弯曲系数逐渐增加;当 PGA 增加到一定程度后,截面已经充分开裂,此时有效截面仅剩截面腹板部分局部区域,有效截面形心相对于质心的偏移反而减小,从而使得双弯曲系数降低。

3 结 语

(1)对于单轴对称截面的桥墩,当沿着垂直于对称轴方向施加地震激励时,除在激励方向会产生地震响应外,还会在垂直激励方向产生地震响应,即出现“双弯曲”现象。

(2)“双弯曲”现象是由于桥墩截面的混凝土不对称开裂,使得有效截面的形心相对于质心在垂直于激励方向产生偏移,从而使得动轴力在垂直于激励方向产生附加弯矩所导致。如沿桥墩对称轴方向施加地震激励,则不会出现“双弯曲”现象。

(3)对于单轴对称截面的桥墩,在垂直于对称轴地震激励作用下,其双弯曲系数随着 PGA 的增加后降低,当 PGA 达到某个值之后,双弯曲系数不再有过大的变化,趋向于一个稳定值。

(4)目前现行设计规范^[7-8]尚未对异形桥墩,尤其是单轴对称截面的桥墩在单向地震作用下,垂直于地震方向产生附加弯矩提出相关设计方法,建议在该类桥墩的设计过程中应进行考虑。

(下转第 166 页)